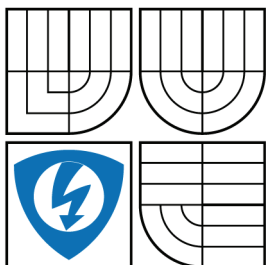


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# POKROČILÁ NAVIGACE V HETEROGENNÍCH MULTIROBOTICKÝCH SYSTÉMECH VE VNĚJŠÍM PROSTŘEDÍ ADVANCED NAVIGATION IN HETEROGENEOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS IN OUTDOOR ENVIRONMENT

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS - SHORTENED VERSION

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. TOMÁŠ JÍLEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDĚK ŽALUD, Ph.D.

BRNO 2015

# OBSAH

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>                                                | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Navigace v mobilní robotice</b>                         | <b>4</b>  |
| 2.1      | Souřadnicové systémy . . . . .                             | 4         |
| 2.2      | Sebelokalizace . . . . .                                   | 5         |
| 2.2.1    | Globální družicové navigační systémy . . . . .             | 6         |
| 2.2.2    | Inerciální navigační systémy . . . . .                     | 7         |
| 2.2.3    | Odometrie a gyrodometrie . . . . .                         | 10        |
| 2.2.4    | Metodiky vyjádření chyb pozice . . . . .                   | 10        |
| <b>3</b> | <b>Cíl dizertační práce</b>                                | <b>11</b> |
| <b>4</b> | <b>Navigační metoda</b>                                    | <b>12</b> |
| <b>5</b> | <b>Navigace v režimu konvoje</b>                           | <b>16</b> |
| 5.1      | Podmínky navigace . . . . .                                | 16        |
| <b>6</b> | <b>Realizované experimenty</b>                             | <b>18</b> |
| 6.1      | Plošné měření intenzity gama záření . . . . .              | 18        |
| 6.2      | Porovnání sebelokalizačních metod . . . . .                | 20        |
| 6.3      | Použití více navigačních metod pro režim konvoje . . . . . | 22        |
| <b>7</b> | <b>Zhodnocení a závěr</b>                                  | <b>24</b> |
|          | <b>Literatura</b>                                          | <b>26</b> |

# 1 ÚVOD

Dlouhodobým trendem mobilní robotiky je snaha dosáhnout úplné nebo alespoň částečné autonomie mobilních robotů. Jedním z autonomních principů jejich chování je i schopnost autonomně řízeného pohybu na základě definovaného úkolu. V současnosti již existuje řada komerčních realizací, které využívají pro navigaci mobilních prostředků přesné metody určení absolutní pozice a orientace. Tyto metody však obvykle předpokládají specifické pracovní podmínky, které jsou pro danou aplikaci dosažitelné a relativně snadno splnitelné.

Komplikace ovšem nastávají v prostředích se zhoršeným příjmem GNSS signálů, při řešení náročnějších nebo obecnějších problémů spadajících do oblasti, souhrnně pojmenované jako *servisní robotika* (*field robotics*). Příkladem může být široce zkoumaný problém vyhledávání osob v neštěstím postižené oblasti.

Autonomní pohyb mobilního robotu v sobě zahrnuje řešení několika dílčích problémů [3]. Zcela klíčovou úlohou je již zmíněné určení dostatečně přesné pozice a orientace mobilního robotu ve zvoleném souřadnicovém systému. Druhou z dílčích úloh je stanovení pozice cíle. Poslední z úloh řeší způsob dosažení cílové pozice z místa aktuální pozice mobilního robotu. V případě operátorem dálkově řízeného mobilního robotu vychází řešení většiny nebo všech jmenovaných úloh ze schopností operátora.

Dizertační práce se zabývá řešením autonomní jízdy pozemních mobilních robotů na základě známé žádané trajektorie jejich pohybu s důrazem na dosažení vysoké shody žádané a skutečné trajektorie. Pohyb mobilního robotu je předpokládán v obecném neznámém terénu, který není možné předem modifikovat. Koncept zvolené navigace proto stojí na využití globálních lokalizačních systémů. Navržené metody uvažují aspekty navigace mobilních prostředků v reálných podmínkách vnějšího prostředí. V práci je zohledněna možnost použití více samostatných sebelokalizačních systémů. Pro další zvýšení robustnosti je umožněna i kombinace jednotlivých řešení pohybu mobilního robotu získaných z odlišných, samostatně pracujících navigačních metod.

Experimenty verifikující reálná nasazení byly prováděny s roboty Orpheus-X3 (obrázek 1.1 vlevo), Orpheus-AC a Taros 6x6 V2 (obrázek 1.1 vpravo).



Obr. 1.1: Mobilní roboti Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2

## 2 NAVIGACE V MOBILNÍ ROBOTICE

Navigace v pojetí mobilní robotiky představuje proces automatického řízení pohybu mobilního robotu za účelem dosažení zvoleného cíle [2],[10]. Obecně se tato úloha dělí na jednotlivé části [3], které samostatně řeší:

- **sebelokalizaci** – kde se robot aktuálně nachází
- **cíl cesty** – koncový bod trajektorie nebo účel této trajektorie
- **realizaci trajektorie** – plánování pohybu mobilního robotu

Způsobů řešení uvedených částí existuje v současnosti nespočet. Velmi často jsou tato řešení založena na použití [14]:

- globálních družicových navigačních systémů
- inerciálních navigačních systémů
- dead-reckoning metod založených na kinematice stroje
- laserových skenerů a dálkoměrných kamer
- pozemních radiofrekvenčních systémů lokalizace
- strojového zpracování obrazu z kamer

### 2.1 Souřadnicové systémy

Pro úlohu sebelokalizace mobilního robotu musí být nejprve definován souřadnicový systém, ve kterém bude lokalizace mobilního robotu realizována. Souřadnicové systémy lze rozdělit podle rozsahu použití na globální a lokální a také podle jejich typu na prostorové a rovinné. Globální souřadnicové systémy se používají pro popis pozice v kontextu celé zeměkoule. Typickým globálním souřadnicovým systémem je WGS-84, který je využíván systémem GPS. Součástí tohoto standardu je definice referenčního aproximujícího elipsoidu a odchylky od něj popisujícího geoidu EGM84. Dalším často používaným systémem je *univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic* (UTM), který dělí zemský povrch do 60ti zón. Tento systém představuje zobrazení zón (část povrchu rotačního elipsoidu) do roviny. Výhodou tohoto systému je možnost přímé realizace metrických operací s jednotlivými body oproti systémům s polárními souřadnicemi – např. WGS-84, který využívá dvě polární souřadnice a jednu metrickou souřadnici. Vzhledem k tomu, že tyto systémy jsou platné celosvětově, vzniká problém s časovou stabilitou souřadnic bodů, ležících na odlišných kontinentálních deskách. Proto jsou pro jednotlivé kontinentální desky definovány souřadnicové systémy, které jsou ukotveny k dané kontinentální desce v několika definovaných bodech, které jsou součástí definičního rámce daného souřadnicového systému. Změna souřadnic daného bodu, ke které dochází vlivem pohybu kontinentální desky, na které daný bod leží, je tímto přístupem řádově snížena. Pro euroasijskou kontinentální desku se používá systém ETRS-89. Způsob realizace tohoto systému na základě GNSS technologií je popsán v [5].

Na úrovni států se používají specifické souřadnicové systémy, definující postupy, které minimalizují transformační chybu mezi vyjádřením pozice polárními souřadnicemi a metrickými souřadnicemi pravoúhlé souřadnicové sítě. Tyto systémy využívají bodových polí pro definici transformačního klíče pro danou oblast. Na území České a Slovenské republiky se pro tyto účely používá systém S-JTSK.

Pro účely mobilní robotiky se často používají lokální kartézské souřadnicové systémy (*local level frame*) s rozsahem platnosti jednotlivých os v řádu stovek metrů. V těchto případech lze použít pro transformaci mezi polárními souřadnicemi a souřadnicemi pravoúhlé mřížky, lineárních náhrad vybraných částí transformačního postupu. Tím dojde ke zjednodušení celého transformačního procesu.

Pro popis umístění senzorů na mobilním robotu je použit souřadnicový systém, který je fixován k mobilnímu robotu (*vehicle frame*). Souřadnicový systém spojený s tělem senzoru je označován jako *body frame*.

## 2.2 Sebelokalizace

Obecná úloha lokalizace řeší určení souřadnic pozice a úhlů orientace daného objektu. Nejčastěji je pro určování pozice mobilního robotu zvolen počátek jeho lokálního souřadnicového systému. Pozice mobilního robotu potom představuje pozici uvedeného počátku souřadnicového systému v předem zvoleném souřadnicovém systému, který je spojen s prostorem, ve kterém se robot pohybuje. V mobilní robotice se často setkáváme se speciálním případem lokalizace a to sebelokalizací, kdy robot autonomně určuje souřadnice své pozice a úhly své orientace. Sebelokalizace má v obecném prostředí šest stupňů volnosti. Ve specifických případech může být ale počet stupňů volnosti menší – např. uvnitř budov se často uvažují pouze tři stupně volnosti – dvě poziční souřadnice horizontální roviny a jeden úhel orientace (typicky azimut).

Sebelokalizace mobilního robotu může být řešena mnoha odlišnými způsoby. Každý ze způsobů je ale vždy určitým kompromisem mezi zvolenými kritérii. Univerzální a dobře fungující řešení za všech okolností v současné době stále neexistuje.

Pro navigační metodu popsanou v této dizertační práci jsou v kontextu jejího nasazení důležité sebelokalizační systémy, jejichž funkce není plošně omezena a nevyžadují předchozí uživatelskou modifikaci prostředí, ve kterém se robot pohybuje, ani exaktní znalost jeho prostorového uspořádání (digitální 3D mapa). Základní sebelokalizační metody, se kterými se počítá při použití navigační metody, jsou:

- **globální družicové navigační systémy (GNSS)**
- **inerciální navigační systémy (INS)**
- **dead-reckoning metody** – odometrie a gyrodometrie

## 2.2.1 Globální družicové navigační systémy

Globální družicové navigační systémy představují celosvětově dostupné služby, které umožňují autonomní určení pozice uživatelských GNSS přijímačů. Pro určení globální pozice jsou použity elektromagnetické vlny vysílané nestacionárními družicemi, které obíhají zemi ve výšce přibližně 20 km nad zemským povrchem [13].

V současné době lze považovat za plně použitelné globální družicové navigační systémy americký systém GPS a ruský systém GLONASS. V dohledné době se předpokládá také zahájení funkčnosti evropského systému GALILEO. V budoucnu lze také předpokládat rozšíření funkčnosti čínského systému Compass (Beidou-2) tak, aby bylo možné získat celosvětově samostatné poziční řešení z tohoto systému bez nutnosti kombinace signálů z ostatních systémů.

### Režimy řešení pozice

Současné pokročilé GNSS přijímače mohou poskytovat poziční řešení získané v různých režimech své funkce. Klíčovým rozdílem je princip měření vzdálenosti mezi družicí a anténou GNSS přijímače. Měření vzdálenosti využívá buď tzv. kódový nebo fázový princip měření. Kódové měření vzdálenosti je založeno na hledání časového zpoždění přijímaného signálu jeho korelací s předem známou kódovou sekvencí. Na základě takto určené doby šíření elektromagnetické vlny z dané družice a předpokládané rychlosti šíření vlny v prostředí je určena vzdálenost mezi družicí a přijímací anténou GNSS přijímače. Dalším z možných způsobů určení vzdálenosti je určení souhrnného fázového posuvu nosné elektromagnetické vlny. Toto měření přináší řádově lepší rozlišení. Délka jednoho bitu v prostoru je u kódového měření pro L1 GPS C/A kód přibližně 300 m, pro L1 GPS P(Y) kód přibližně 30 m. Délka nosné elektromagnetické vlny v prostoru je přibližně 0,19 m pro pásmo L1 a přibližně 0,24 m pro pásmo L2 [13]. Zde je patrná teoretická možnost dosažení podstatně lepší přesnosti měření vzdálenosti při předpokladu stejné procentuální přesnosti měření dané primární veličiny. Měření fázového zpoždění GNSS signálů, způsobeného dobou jejich šíření, ale zahrnuje několik poměrně velkých komplikací. Předním problémem je velmi nízká úroveň samotného nosného signálu, která je často pod úrovní šumu. Kódové měření se také potýká s tímto problémem, ale tam je možné úspěšně daný kód identifikovat na základě znalosti jeho průběhu a použití korelace. Druhým problémem je krátká perioda nosné vlny, takže signál pro dálkoměrné měření se na měřeném úseku několikrát opakuje. Pro celkový fázový posuv je tedy nutné určit celkový počet period nosného signálu a tzv. fázový doměrek.

**Autonomní řešení** pozice je založeno pouze na příjmu signálů z družic GNSS systémů, bez využívání jakýchkoli doplňujících nebo korekčních dat. Tento typ řešení využívá vždy pouze kódové měření vzdálenosti. Přesnost tohoto řešení závisí výrazněji na aktuálních podmínkách – obecně se pohybuje v jednotkách metrů.

**Diferenciální řešení** pozice, často označované jako DGNSS, pracuje s korekčními daty určenými pro kódové měření. Korekční data mohou být získána jejich příjmem z družice nebo z pozemní korekční stanice nebo sítě. Přesnost tohoto řešení pozice nebývá lepší než 0,25 m (horizontální DRMS) při použití GBAS. Pro SBAS jsou typicky výsledky horší z důvodu

použití korekcí platných pro rozsáhlejší území a nikoliv pro rozsah jednotek kilometrů jako u GBAS. Typická přesnost horizontální pozice je 0,5 m (DRMS).

**RTK řešení** pozice je založeno na fázovém měření vzdálenosti a použití korekčních dat v reálném čase pro měření fáze. Jedná se o nejpokročilejší režim určení pozice v reálném čase, kterým disponují současné GNSS přijímače. Korekční data bývají nejčastěji získána přenosem pomocí datových sítí přímo z pozemního podpůrného systému (GBAS). Jedná se vždy o služby třetích stran, které jsou často zpoplatněny.

Existují i další řešení využívající převážně korekčních dat distribuovaných přes družice. Tyto systémy buď nedosahují přesnosti RTK řešení, nebo jsou primárně určeny pro měření statických bodů. Jejich výhodou je celosvětová dostupnost korekčních dat, která nevyžaduje externí přijímače korekčních dat, jako je tomu např. u RTK řešení.

## Podpůrné systémy

Podpůrné systémy pro existující GNSS umožňují dosažení vyšší přesnosti určení pozice než při použití samotných GNSS. Tyto systémy jsou často samostatně provozovány třetími stranami. Jejich rozdělení lze provést na základě použitého způsobu přenosu dat.

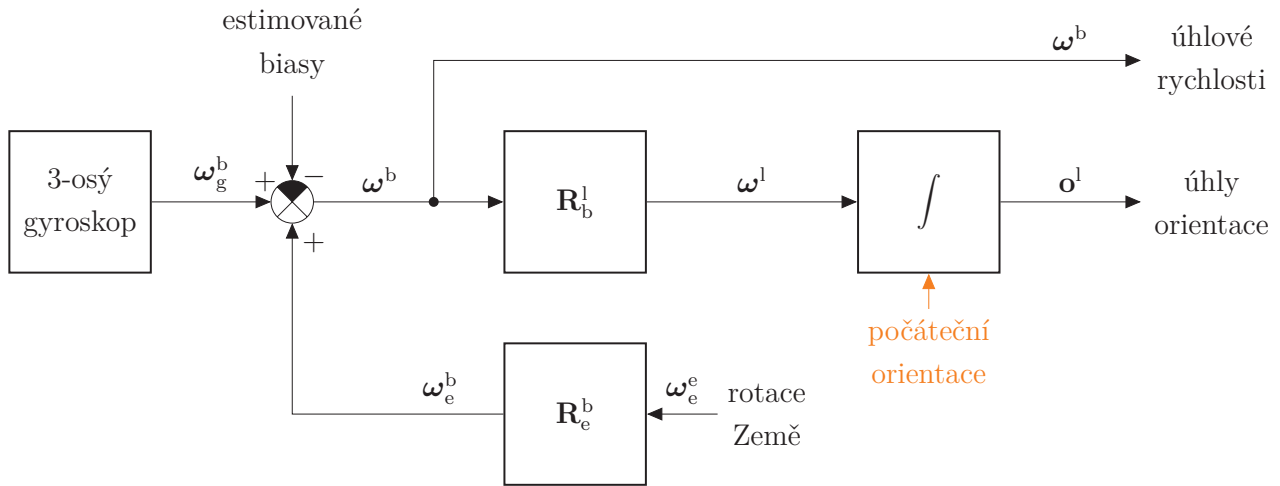
Rozšiřující systémy využívající pro distribuci korekčních dat geostacionární družice jsou označovány jako SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*). Výhodou těchto systémů je, že jejich uživatelé nepotřebují další vybavení pro získání korekčních dat a často také celosvětová dostupnost těchto dat. Nevýhodou ovšem může být omezený příjem signálu, daný nevhodnou observací z daného měřicího místa. Korekce jsou typicky určeny pro větší území, není možné distribuovat individuální řešení pro každého uživatele.

Pozemní podpůrné systémy (GBAS – *Ground Based Augmentation Systems*) mohou být realizovány samostatnými GNSS přijímači se známou pozicí jejich přijímacích antén nebo skupinou plošně rozmístěných GNSS přijímačů tvořící síť permanentních stanic. Síť permanentních stanic může poskytovat korekce z vypočítané tzv. virtuální referenční stanice (VRS).

### 2.2.2 Inerciální navigační systémy

Inerciální navigační systémy používají inerciální snímače (akcelerometry a gyroskopy) pro určování úhlů orientace a souřadnic pozice měřeného objektu. Aby bylo možné určit kompletní soubor souřadnic pozice a úhlů orientace, používá se vždy trojice akcelerometrů a gyroskopů. Snímače dané fyzikální veličiny jsou vzájemně prostorově ortogonálně uspořádané. Původní systémy využívaly mechanicky stabilizovanou základnu, na které byly inerciální senzory osazeny. Jedná se tzv. *gimballed* konstrukci. Rozvoj digitálního zpracování signálů umožnil vznik tzv. *strap-down* konstrukce, u které jsou inerciální senzory mechanicky pevně spojeny s tělem INS. Potřebná transformace měřených inerciálních veličin v souřadnicovém systému spojeném s tělem INS do lokálního souřadnicového systému spojeného s prostorem, ve kterém je pohyb určován, je realizována matematicky a nikoliv mechanicky jako u *gimballed* konstrukce. Jednotlivými aspekty inerciální navigace se podrobně zabývají knihy [8],[9],[10].

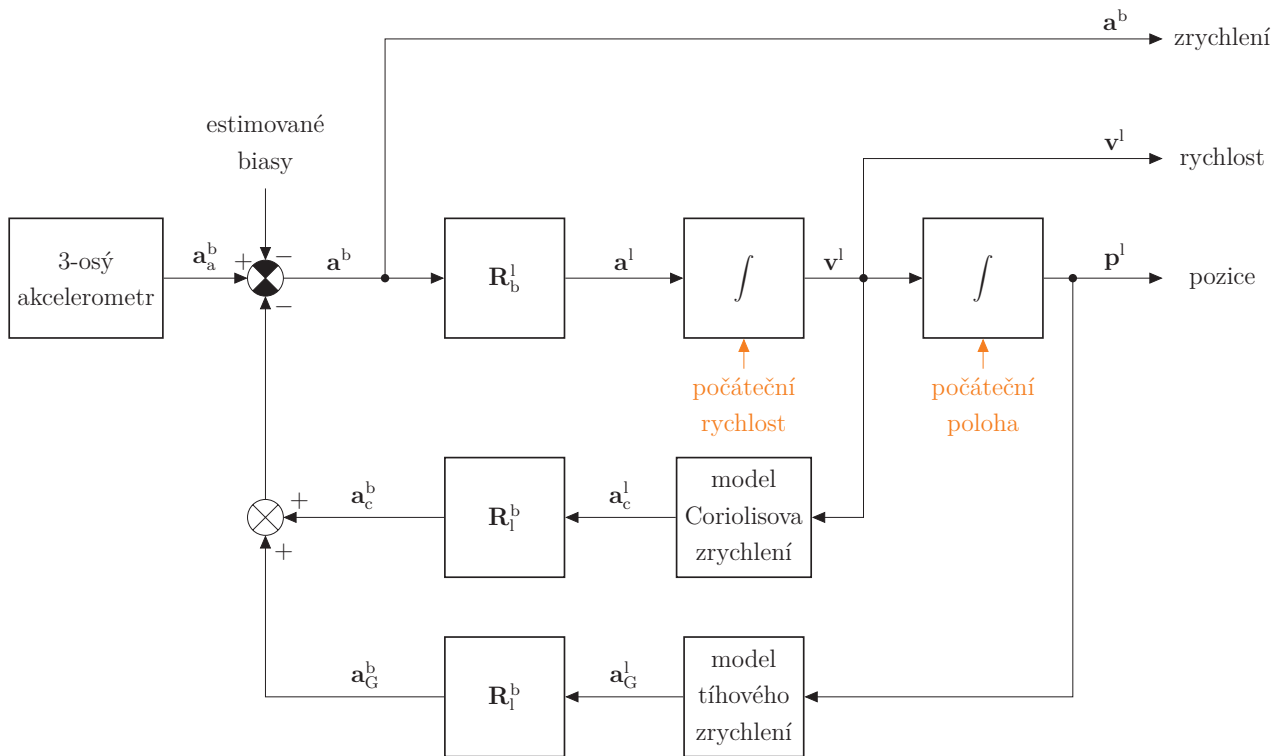
Zjednodušený princip zpracování dat z gyroskopu pro určení úhlů orientace je uveden na obrázku 2.1. Ze souboru tří úhlových rychlostí, které jsou naměřeny třemi vzájemně ortogonálními gyroskopy, je odstraněna hodnota aktuálně estimovaných biasů a hodnota úhlové rychlosti Zemské rotace. Výsledná trojice úhlových rychlostí je transformována do lokálního souřadného systému, ve kterém je pohyb objektu určován. Matice  $\mathbf{R}_b^l$  představuje aktuální matici rotace pro realizaci rotace souřadnicového systému spojeného s tělem INS (*body frame*) do lokálního souřadnicového systému (*local frame*). Tyto transformované úhlové rychlosti jsou následně v čase integrovány. Pro získání absolutních úhlů rotace je nutné z externího zdroje zajistit počáteční hodnoty integrátorů (počáteční úhly rotace). Bez znalosti těchto konstant je možné měřit jen změnu orientace od počátku měření.



Obr. 2.1: Základní princip strap-down INS – řešení orientace

Vzhledem k tomu, že úhly orientace jsou získány integrací úhlových rychlostí v čase, jejich chyba v čase narůstá vlivem chyby měření úhlových rychlostí. Pro limitování chyby orientace je proto nutné zajistit průběžnou opravu stavu integrátorů na základě absolutních úhlů orientace získaných z jiného zdroje.

Na obrázku 2.2 je uveden zjednodušený princip zpracování dat z akcelerometru. Akcelerometrem je měřeno celkové zrychlení, které na něj působí. Od tohoto vektoru je odečten vektor reprezentující aktuální estimované biasy jednotlivých akcelerometrů. Dále je odečten transformovaný vektor Coriolisova zrychlení a transformovaný vektor tíhového zrychlení. Oba vektory jsou primárně určeny v lokálním souřadnicovém systému, a proto jsou pomocí transformace  $\mathbf{R}_b^l$  transformovány do souřadného systému akcelerometrů. Získaná výslednice zrychlení je transformována do lokálního souřadnicového systému a dvakrát v čase integrována pro získání souřadnic pozice. Pro získání pozice v globálním souřadnicovém systému je nutné opět zajistit počáteční podmínky pro trojici integrátorů zrychlení a trojici integrátorů rychlosti. Ve schématu není z důvodu zjednodušení zahrnuta estimace dynamických zrychlení způsobených rotačním pohybem, které je třeba také kompenzovat. Transformační matice rotace  $\mathbf{R}$  jsou získány z úhlů orientace uvedených ve schématu na obrázku 2.1.



Obr. 2.2: Základní princip strap-down INS – řešení pozice

Uvedený princip určení souřadnic pozice vykazuje také růst jejich chyby s rostoucím časem měření. Růst chyby má kvadratický charakter, za předpokladu konstantního charakteru chyby měření zrychlení a současně zanedbatelné chyby orientace. V reálných situacích chyba ale narůstá strměji než kvadraticky s časem právě vlivem narůstající chyby orientace, pokud není zajištěna její korekce z absolutního zdroje orientace. Dalším vlivem, který zvyšuje strmost růstu je růst chyby měření zrychlení. K tomu dochází po výpadku estimace biasů akcelerometrů při výpadku externích pozičních referencí.

Řešení pozice a orientace získané ze samotných inerciálních navigačních systémů má časově omezenou použitelnost. Proto se přistupuje ke vzájemné integraci INS a systémů pro měření absolutní pozice a orientace. Nejčastěji se jedná o vzájemnou integraci GNSS a INS systémů. Výsledkem této integrace je potom systém, který přináší výhody obou systémů. GNSS zajišťuje zdroj absolutní pozice a orientace, které nevykazují drift, ovšem jejich řešení má malou obnovovací frekvenci. Tyto data zajišťují opravu stavů integrátorů a současně je na jejich základě prováděna estimace biasů akcelerometrů a gyroskopů. INS přináší vyšší obnovovací frekvenci (běžně stovky Hz) než GNSS a umožňuje překlenout dočasný výpadek GNSS řešení. Problematice integrace GNSS a INS se rozsáhle věnují knihy [8][9]. Způsob integrace GNSS a INS lze zařadit do jedné z následujících koncepcí:

- **loosely coupled** – pouze pozice a rychlost z GNSS slouží pro korekci INS
- **tightly coupled** – pro korekci INS jsou použita i surová data z GNSS
- **deeply coupled** – surová data z GNSS jsou použita pro korekci INS a opačně

### 2.2.3 Odometrie a gyrodometrie

Odometrie patří mezi typické dead-reckoning metody a jedná se proto o relativní metodu sebelokalizace [7][9]. Změna odhadu pozice a orientace mobilního robotu je provedena na základě změny stavů jeho jednotlivých kol. Stavovou veličinou kola je vždy jeho absolutní úhlové natočení a v případě možnosti jeho stranového natáčení je druhou stavovou veličinou úhel jeho stranového vytočení. Úhel natočení kola nebo hřídele příslušného pohonu je měřen snímačem úhlového natočení (inkrementální optický senzor, resolver apod.). Na základě známé kinematiky pohybu daného podvozku je možné transformovat uvedené změny stavových veličin kol na změnu pozice a orientace mobilního robotu v jeho zvoleném bodě. Pokročilé metody zahrnují mezi stavové veličiny modelu kola [6] i další jeho veličiny – např. rychlost, obvod apod.

V případě řešení výpočtu souřadnic pozice v obecném třídimenčním prostoru je potřeba pro transformaci znát i ostatní úhly orientace mobilního robotu. Tyto úhly ale není možné metodou odometrie určit a musí být získány z jiného zdroje lokalizačních dat, např. z INS. Tato metoda, která kombinuje informace o ujeté vzdálenosti a úhlů orientace z externího systému se často označuje jako gyrodometrie [4]. Při použití všech úhlů orientace z externího systému, jež nevykazují významný drift, je možné získat významně lepší výsledky pozice, protože citlivost přesnosti pozice na přesnost azimutu mobilního robotu je velmi významná.

Obdobně jako INS vykazují růst chyby jejich řešení s rostoucím časem, tak i gyrodometrie vykazuje růst chyby a to s ujetou vzdáleností. Příčinou je sumace jednotlivých dílčích elementů trajektorie. K růstu chyby odometrie dochází nejen s růstem ujeté vzdálenosti, ale i se souhrnnou hodnotou úhlu rotace kolem vertikální osy mobilního robotu.

### 2.2.4 Metodiky vyjádření chyb pozice

Trendem posledních období měřicí techniky je přechod od klasického přístupu vyjádření chyb měření pomocí limitních odchylek k pravděpodobnostnímu modelu ve formě nejistot měření [11]. Komerčně dostupné sebelokalizační systémy často ani informaci o aktuální chybě lokalizačních dat v reálném čase neposkytují. V těchto případech je uživatel odkázán jen na specifikaci přístroje. Zde uvedené chyby jsou ale většinou platné jen pro specifické měřicí podmínky. Většina přístrojů disponuje informací o aktuální přesnosti poskytovaných údajů. Často jsou ale použity specifické metriky, které jsou mezi zařízeními neslučitelné. Ve většině případů zahrnuje poskytovaný údaj o přesnosti jak systematickou složku chyby měření tak i náhodnou složku měření. Systematickou složkou se rozumí tzv. pravdivost (*trueness*) měření a náhodnou složku tzv. preciznost (*precision*) měření. Výsledná přesnost (*accuracy*) měření zahrnuje obě tyto složky. I když je význam těchto pojmů ustanoven mezinárodním metrologickým slovníkem [1], někteří výrobci uvedených zařízení tuto stanovenou terminologii nerespektují.

### 3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce si klade za cíl navrhnout způsob řešení navigace autonomních pozemních mobilních robotů ve vnějších prostředích, který bude dosahovat vysoké přesnosti sledování žádané trajektorie jejich jízdy. Řešení by mělo umožňovat funkčnost i v komplikovaných terénech se špatnou dostupností GNSS signálů. Metoda předpokládá obecný, předem neznámý terén, který není možné jakkoliv modifikovat pro zajištění správné funkce sebelokalizačních systémů. Navržený koncept by měl reflektovat aspekty reálného nasazení a obsahovat proto prvky podporující vysokou spolehlivost řešení v reálných podmínkách. Především se jedná o snadnou realizovatelnost redundance, dynamického přepínání metod v závislosti na aktuálních pracovních podmínkách a snadnou rozšiřitelnost systému v budoucnu. Konfigurace samotné metody by měla být co nejjednodušší, nevyžadující složitou parametrizaci a estimaci konstant, které nemají přímou fyzikální interpretovatelnost. Celkové řešení by mělo být uzpůsobeno aplikačním potřebám, ve kterých je nutné zajistit rychlou a snadnou nasaditelnost řešení v praxi.

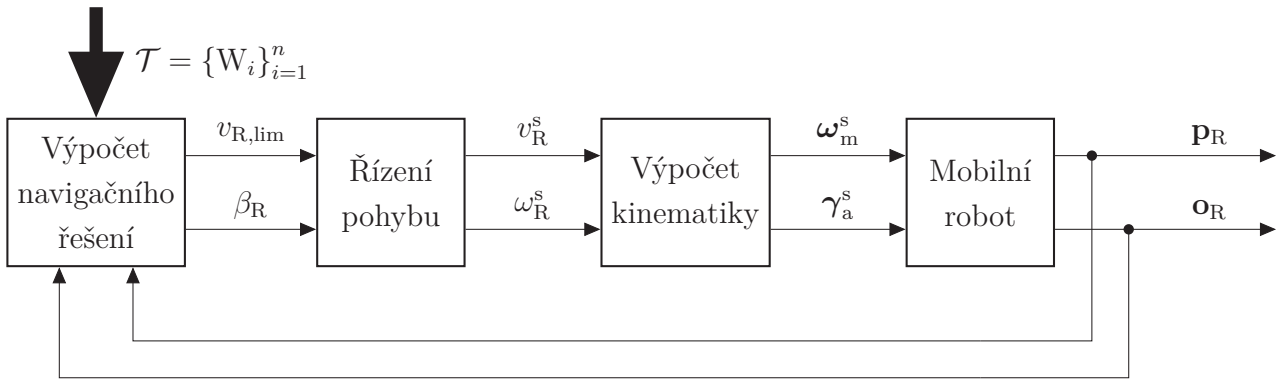
Navigační metoda předpokládá využití současných GNSS přijímačů s RTK řešením. Použití RTK GNSS zajistí zdroj přesné absolutní pozice v obecném terénu, které nevyžaduje jeho předchozí uživatelskou modifikaci. V podmínkách, kdy nevyhovuje přesnost použitého GNSS systému, se předpokládá využití metod typu *dead-reckoning*, především gyrodometrie a odometrie, založených na kalibrovaném kinematickém modelu podvozku mobilního robotu.

Významné vlastnosti navrhované navigace jako celku lze shrnout do následujících bodů:

- přesnost sledování trajektorie žádaného pohybu
- funkčnost v oblastech s nevyhovujícím řešením získaným z GNSS
- možnost integrace samostatných, externě realizovaných navigačních metod
- snadná nasaditelnost řešení v praxi

## 4 NAVIGAČNÍ METODA

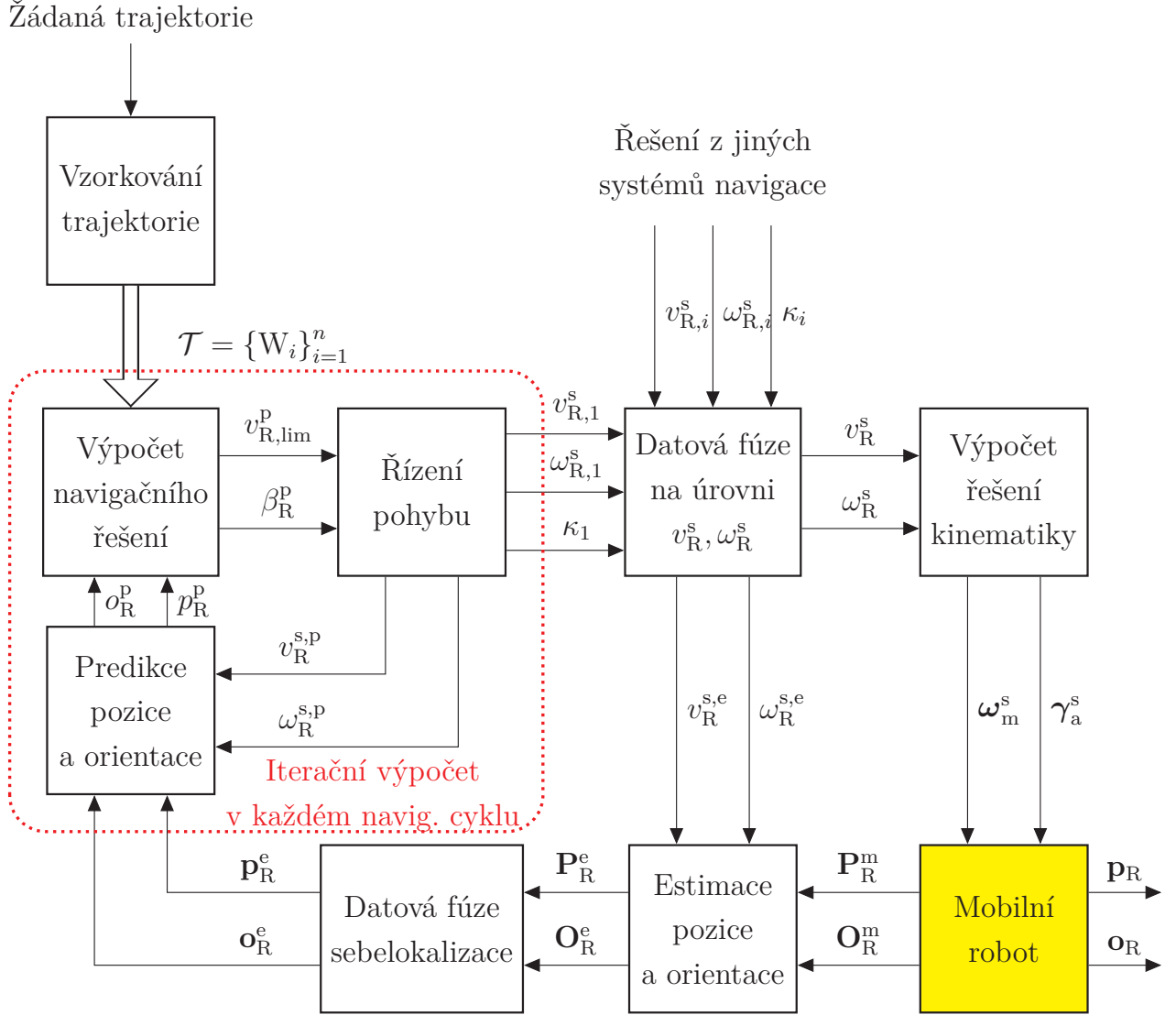
Koncepce navržené navigační metody umožňuje realizovat navigaci bezposádkových strojů v obecném tří-dimenzionálním prostoru. Implementována a v reálných experimentech byla ověřena její dvou-dimenzionální varianta, určená pro navigaci pozemních mobilních robotů (UGV) s neholonomním podvozkem. Zvolená koncepce navigační metody vyžaduje dostupnost souřadnic pozice mobilního robotu a popisu jeho žádané trajektorie pohybu ve zvoleném souřadnicovém systému. Všechny použité funkční bloky byly od počátku koncipovány jako plně parametrizovatelné, což přináší snadnou konfiguraci celé navigační metody pro rozdílné typy a parametry podvozků mobilních robotů.



Obr. 4.1: Ideové blokové schéma navržené navigační metody

Ideové blokové schéma navržené navigační metody je uvedeno na obrázku 4.1. Do bloku *Výpočet navigačního řešení* vstupuje posloupnost  $\mathcal{T}$  bodů  $W$ , která popisuje žádanou trajektorii pohybu mobilního robotu. Výsledkem řešení navigační úlohy je dvojice veličin:  $v_{R,lim}$  – limitní dopředná rychlost mobilního robotu a  $\beta_R$  – aktuální odchylka azimutu  $\alpha_R$  mobilního robotu od jeho žádané hodnoty. Tyto dvě veličiny jsou vstupem pro výpočet parametrů žádaného pohybu mobilního robotu. Pohyb uvažovaných mobilních robotů lze popsat pomocí jejich dopředné rychlosti  $v_R$  a úhlové rychlosti  $\omega_R$ . Ze žádaných hodnot dopředné a úhlové rychlosti ( $v_R^s$  a  $\omega_R^s$ ) je proveden výpočet žádaných hodnot říditelných veličin jednotlivých říditelných kol daného mobilního robotu na základě jeho kinematického modelu. Tuto skupinu veličin tvoří vždy vektor  $\omega_m^s$  žádaných úhlových rychlostí pohonů jednotlivých říditelných kol a v případě existence aktuátorů pro jejich natáčení, také vektor  $\gamma_a^s$  žádaných úhlů jejich natočení. Tyto uvedené veličiny představují akční zásahy pro změnu vektoru  $\mathbf{p}_R$  souřadnic pozice a vektoru  $\mathbf{o}_R$  úhlů orientace mobilního robotu. Vektory  $\mathbf{p}_R$  a  $\mathbf{o}_R$  jsou z pohledu regulace výstupními regulovanými veličinami, a proto jsou ve zpětné vazbě zavedeny zpět do bloku *Výpočet navigačního řešení*. Celý řetězec výpočtů se periodicky opakuje se zvolenou frekvencí  $f_c$  navigačního cyklu. Uvedené blokové schéma neuvažuje existenci žádných dopravních zpoždění, využití více než jednoho sebelokalizačního systému, možnost integrace výsledných řešení externích navigačních metod a v neposlední řadě také omezení dynamiky pohybu mobilního robotu (zejména

existenci rozběhových a doběhových ramp u použitých pohonů a aktuátorů apod.). Rozšířené blokové schéma, zahrnující uvedené aspekty, jenž mají významný vliv na dosahovanou přesnost sledování žádané trajektorie, je proto uvedeno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Rozšířené blokové schéma realizované navigační metody

Převod vstupní specifikace žádané trajektorie pohybu mobilního robota do posloupnosti  $\mathcal{T}$  diskrétních navigačních bodů  $W$  je proveden v bloku *Vzorkování žádané trajektorie*.

$$v_{R,\text{lim}}^p(t) = \{v_{R,\text{lim}}(t + \tau_c), \dots, v_{R,\text{lim}}(t + \Delta t_p)\}, \quad \tau_c < \Delta t_p \quad (4.1)$$

$$\beta_R^p(t) = \{\beta_R(t + \tau_c), \dots, \beta_R(t + \Delta t_p)\}, \quad \tau_c < \Delta t_p \quad (4.2)$$

V bloku *Výpočet navigačního řešení* se iterativně počítají prvky posloupnosti  $v_{R,\text{lim}}^p$  4.1 predikovaných limitních dopředných rychlostí  $v_{R,\text{lim}}$  pro časový interval  $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$  a prvky

posloupnosti  $\beta_R^p$  4.2 predikovaných odchylek  $\beta_R$  pro stejný časový interval. Dopravní zpoždění  $\tau_c$  představuje délku časového intervalu mezi okamžikem zahájení navigačního cyklu a provedením fyzického akčního zásahu na pohonech a aktuátorech. Do uvedeného časového intervalu je zahrnut alokovaný čas na veškeré výpočty v navigačním cyklu, přenos dat do řídicí jednotky pohonů a čas potřebný k vykonání akčních zásahů na pohonech a aktuátorech podvozku mobilního robotu. Konec časového okna definovaný veličinou  $\Delta t_p$  je počítán v bloku *Řízení pohybu*. Hodnota této veličiny závisí na aktuálním stavu pohonů a aktuátorů robotu.

Blok *Řízení pohybu* počítá posloupnost  $v_R^{s,p}$  4.3 predikovaných žádaných dopředných rychlostí  $v_{R,1}^s$  a posloupnost  $\omega_R^{s,p}$  4.4 predikovaných žádaných úhlových rychlostí  $\omega_{R,1}^s$  mobilního robotu. Obě uvedené posloupnosti jsou počítány pro aktuální predikční interval  $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$ . Výstupem bloku *Řízení pohybu* jsou žádané hodnoty dopředné a úhlové rychlosti ( $v_{R,1}^s$  a  $\omega_{R,1}^s$ ), které jsou platné pro predikovaný časový okamžik  $t + \tau_c$ . Hodnoty těchto veličin odpovídají hodnotám prvních prvků v posloupnostech  $v_R^{s,p}$  a  $\omega_R^{s,p}$ . Vektory  $\mathbf{v}_{R,f}^s$  4.5 resp.  $\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s$  4.6 jsou tvořeny veličinami  $v_{R,1}^s, \dots, v_{R,n}^s$  resp.  $\omega_{R,1}^s, \dots, \omega_{R,n}^s$ . Dvojice veličin  $v_{R,i}^s$  a  $\omega_{R,i}^s$  pochází z  $i$ -té navigační metody, která je v dané aplikaci použita. Tímto je umožněna i integrace navigačních metod s odlišnou koncepcí.

$$v_R^{s,p}(t) = \{v_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, v_{R,1}^s(t + \Delta t_p)\} \quad (4.3)$$

$$\omega_R^{s,p}(t) = \{\omega_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, \omega_{R,1}^s(t + \Delta t_p)\} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{v}_{R,f}^s(t) = (v_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, v_{R,n}^s(t + \tau_c)) \quad (4.5)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s(t) = (\omega_{R,1}^s(t + \tau_c), \dots, \omega_{R,n}^s(t + \tau_c)) \quad (4.6)$$

V bloku *Datová fúze řešení pohybu* je proveden výběr nejlepšího řešení nebo výpočet nového řešení pohybu z vektorů  $\mathbf{v}_{R,f}^s$  a  $\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s$ , které obsahují řešení pohybu získaná z jednotlivých dostupných navigačních metod. Z vektorů  $\mathbf{v}_{R,f}^s$  a  $\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s$  jsou tedy vytvořeny veličiny  $v_R^s$  a  $\omega_R^s$  na základě zvoleného fúzního algoritmu popsaného funkcemi 4.7 a 4.8. Míra očekávané validnosti řešení poskytovaných jednotlivými navigačními metodami je uložena v konfidenčním vektoru  $\boldsymbol{\kappa}_{R,f}$ . V bloku jsou rovněž uchovávány i historické hodnoty veličin  $v_R^s$  a  $\omega_R^s$  z časového intervalu  $\langle t - \tau_{m,max}, t \rangle$ , které jsou potřebné pro estimaci matice  $\mathbf{P}_R^e$  aktuálních vektorů  $\mathbf{p}_R$  souřadnic pozice a matice  $\mathbf{O}_R^e$  aktuálních vektorů  $\mathbf{o}_R$  úhlů orientace pro čas  $t$  z matic  $\mathbf{P}_R^m$  a  $\mathbf{O}_R^m$ , které jsou získány z jednotlivých použitých sebelokalizačních systémů. Délka časového okna je dána hodnotou  $\tau_{m,max}$ , která je určena aktuálním nejdelším zpožděním, které vykazují získané vektory pozice a orientace mobilního robotu.

$$v_R^s = f(\mathbf{v}_{R,f}^s, \boldsymbol{\kappa}_{R,f}) \quad (4.7)$$

$$\omega_R^s = f(\boldsymbol{\omega}_{R,f}^s, \boldsymbol{\kappa}_{R,f}) \quad (4.8)$$

*Výpočet kinematického řešení* realizuje transformaci parametrů  $v_R^s$  a  $\omega_R^s$  žádaného pohybu mobilního robotu na vektory  $\omega_m^s$  (definice 4.9) a  $\gamma_a^s$  (definice 4.10) říditelných veličin použitého podvozku mobilního robotu. Vypočítané akční zásahy jsou platné pro časový okamžik  $t + \tau_c$ .

$$\omega_m^s(t) = (\omega_{w,1}^s(t + \tau_c), \dots, \omega_{w,n}^s(t + \tau_c)) \quad (4.9)$$

$$\gamma_a^s(t) = (\gamma_{a,1}^s(t + \tau_c), \dots, \gamma_{a,n}^s(t + \tau_c)) \quad (4.10)$$

Výstupními veličinami regulované soustavy jsou z pohledu regulace vektor  $\mathbf{p}_R$  souřadnic pozice a vektor  $\mathbf{o}_R$  úhlů orientace mobilního robotu. Pro zpětnou vazbu není možné uvedené vektory získat přímo z důvodu existence dopravních zpoždění, která jsou tvořena dobou trvání výpočtu jednotlivých sebelokalizačních řešení a jejich přenosem do řídicího systému.

Matice  $\mathbf{P}_R^m$  resp.  $\mathbf{O}_R^m$  jsou tvořené vektory  $\mathbf{p}_R^m$  resp.  $\mathbf{o}_R^m$ , které jsou získány z použitých sebelokalizačních systémů. Každý ze získaných vektorů je platný pro jiný časový okamžik. Proto je v bloku *Estimace pozice a orientace* prováděna estimace vektorů pozice a orientace mobilního robotu pro aktuální čas  $t$ , která využívá historických hodnot  $v_R^s$  a  $\omega_R^s$ . Tyto hodnoty jsou uloženy v posloupnostech  $v_R^{s,e}$  (definice 4.11) a  $\omega_R^{s,e}$  (definice 4.12).

$$v_R^{s,e}(t) = \{v_R^s(t - \tau_{m,\max}), \dots, v_R^s(t)\} \quad (4.11)$$

$$\omega_R^{s,e}(t) = \{\omega_R^s(t - \tau_{m,\max}), \dots, \omega_R^s(t)\} \quad (4.12)$$

Z matice  $\mathbf{P}_R^e$  resp.  $\mathbf{O}_R^e$  estimovaných vektorů souřadnic pozice resp. úhlů orientace jednotlivých sebelokalizačních řešení pro aktuální čas  $t$  je v bloku *Datová fúze* vybráno nebo vypočítáno nejlepší řešení vektoru souřadnic pozice resp. vektoru úhlů orientace mobilního robotu na základě předpokládaných přesností jednotlivých vektorů souřadnic pozice resp. úhlů orientace. Matice  $\mathbf{S}_{p,R}^e$  resp.  $\mathbf{S}_{o,R}^e$  obsahuje očekávané směrodatné odchylky jednotlivých souřadnic pozice resp. úhlů orientace mobilního robotu.

$$\mathbf{p}_R^e = f(\mathbf{P}_R^e, \mathbf{S}_{p,R}^e) \quad (4.13)$$

$$\mathbf{o}_R^e = f(\mathbf{O}_R^e, \mathbf{S}_{o,R}^e) \quad (4.14)$$

Vektory  $\mathbf{p}_R^e$  a  $\mathbf{o}_R^e$  jsou v bloku *Predikce pozice a orientace* rozšířeny na predikované posloupnosti  $p_R^p$  a  $o_R^p$  pro predikční interval  $\langle t + \tau_c, t + \Delta t_p \rangle$ . Pro výpočet predikovaných hodnot jsou použity posloupnosti  $v_R^{s,p}$  a  $\omega_R^{s,p}$ . Výpočet jednotlivých hodnot v predikovaných posloupnostech  $p_R^p$  a  $o_R^p$  probíhá vždy znovu s každým cyklem navigačního algoritmu.

$$p_R^p = \{\mathbf{p}_R^p(t + \tau_c), \dots, \mathbf{p}_R^p(t + \Delta t_p)\} \quad (4.15)$$

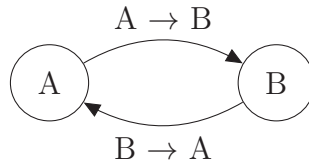
$$o_R^p = \{\mathbf{o}_R^p(t + \tau_c), \dots, \mathbf{o}_R^p(t + \Delta t_p)\} \quad (4.16)$$

## 5 NAVIGACE V REŽIMU KONVOJE

Při navigaci v režimu konvoje vedoucí robot konvoje definuje svou jízdu žádanou trajektorií pohybu navázaných robotů v konvoji. Tito roboti se snaží udržovat od vedoucího robotu vzdálenost měřenou na trajektorii pohybu v zadaném rozsahu, který je definován pro každý robot. Současně ale roboti dodržují i vzájemné bezpečné vzdálenosti pro zamezení kolizím. Navržený režim konvoje umožňuje i specifický režim pro dva roboty, ve kterém může být druhý robot vyslán z výchozího místa se zpožděním a v průběhu jízdy být zase povolán zpět na výchozí místo, ze kterého vyjel. Tento režim vychází z požadavků reálných misí, ve kterých je použit malý průzkumný mobilní robot pro definování trajektorie pohybu většího robotu, který disponuje možností přepravy materiálu nebo osob na rozdíl od průzkumného robotu. Větší robot je povolán do potřebného místa až v případě potřeby. Po jeho dojetí do žádaného místa proběhne naložení/vyložení nákladu a tento robot může následně pokračovat dále po trajektorii průzkumného robotu nebo se navracet zpět do místa, ze kterého vyjel.

### 5.1 Podmínky navigace

Vzhledem k povaze tohoto navigačního režimu nemusí být umožněna kontinuita jízdy mobilního robotu během vybraného časového úseku. Při zastavení některého z robotů musí roboti za ním v konvoji následující zastavit. Každý robot se tedy může nacházet v jednom ze dvou stavů – A/ čekání na splnění podmínek a nebo B/ navigace je aktivní. Pro přechod ze stavu A do stavu B u  $i$ -tého robotu je nutné splnit podmínku definovanou výrazem 5.1 pro každý okolní robot. Pro opačný přechod ze stavu B do stavu A postačí, když je splněna podmínka definovaná výrazem 5.2 pro libovolný z okolních robotů.



Obr. 5.1: Stavový diagram procesu navigace robotu v konvoji

$$l_{i,j} > l_{\text{lim}} + l_{\text{hyst}} \vee \left( l_{i,j} > l_{\text{krit}} \wedge \left| \alpha'_{R,i} - \alpha_{i,j} \right| > 90^\circ \wedge \left| \alpha_{RN,i} - \alpha_{i,j} \right| > 90^\circ \right) \quad \forall j \neq i \quad (5.1)$$

$$\exists j \neq i : l_{i,j} < l_{\text{krit}} \vee l_{i,j} < l_{\text{lim}} \wedge \left( \left| \alpha'_{R,i} - \alpha_{i,j} \right| < 90^\circ \vee \left| \alpha_{RN,i} - \alpha_{i,j} \right| < 90^\circ \right) \quad (5.2)$$

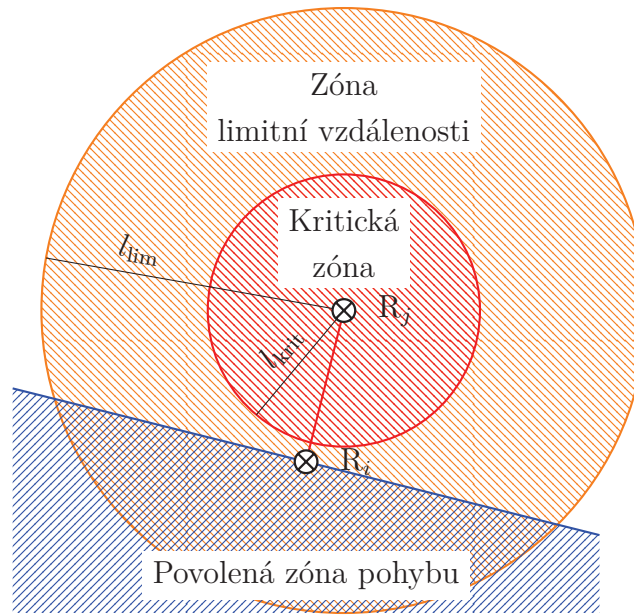
Kde jednotlivé veličiny označují:

$l_{i,j}$  vzdálenost mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým robotem

$l_{\text{lim}}$  limitní povolená vzdálenost mezi roboty

$l_{\text{hyst}}$  hystereze limitní vzdálenosti mezi roboty pro přechod mezi stavy A, B  
 $l_{\text{krit}}$  kritická vzdálenost mezi roboty, při které dochází k nouzovému zastavení  
 $\alpha'_{R,i}$  efektivní azimut  $i$ -tého mobilního robotu  
 $\alpha_{i,j}$  azimut spojnice ze středu  $i$ -tého do středu  $j$ -tého robotu  
 $\alpha_{RN,i}$  žádaná hodnota azimutu  $i$ -tého robotu

Situace při podkročení limitní vzdálenosti mezi navigovaným a nejbližším robotem je ukázána na obrázku 5.2. Zóna, ve které není pohyb navigovaného robotu jakkoliv limitován, je oblast vně kruhu o poloměru  $l_{\text{lim}}$  se středem v aktuální pozici daného okolního robotu. V případě, že se navigovaný robot nachází uvnitř uvedeného kruhu, je jeho pohyb omezen pouze do modře vyšrafované zóny, která zajistí zvýšení vzdálenosti od daného okolního robotu.



Obr. 5.2: Povolená zóna pohybu při podkročení limitní vzdálenosti mezi navigovaným a nejbližším okolním robotem

Ve stavu B je aktuální externí limitní dopředná rychlost  $v_{R,\text{lim}}^{\text{ext}}$  navigovaného robotu odvozena od jeho vzdálenosti k nejbližšímu okolnímu robotu podle převodní funkce. Použití této rampové funkce zajistí postupné snižování rychlosti během přibližování se navigovaného robotu k okolním robotům.

Ve specifickém režimu, kdy se mobilní robot vrací po trajektorii, po které přijel do daného místa, zpět do výchozího místa svého výjezdu, je posloupnost  $\mathcal{T}$  navigačních bodů interpretována v obráceném pořadí. Mobilní robot se může vracet pozpátku, v tomto případě je použita záporná dopředná rychlost a efektivní azimut  $\alpha'_R$  mobilního robotu je opačným úhlem k azimutu  $\alpha_R$  mobilního robotu. V případě dostatku místa kolem robotu může být použito i otočení a následná přímá jízda zpět do výchozího místa.

## 6 REALIZOVANÉ EXPERIMENTY

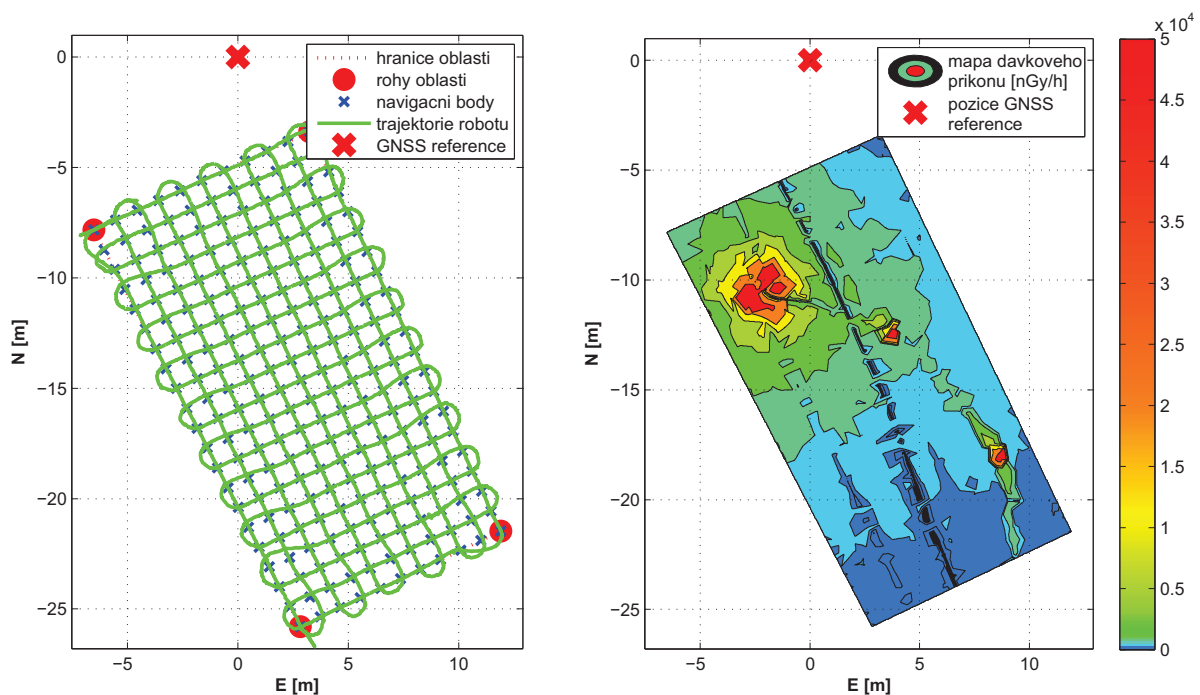
### 6.1 Plošné měření intenzity gama záření

Tento experiment byl proveden ve spolupráci se Státním ústavem radiační ochrany, v.v.i. (SÚRO). Experiment byl proveden za účelem ověření parametrů nově vyvíjeného snímače gama záření v reálném terénu vnějšího prostředí. Vstupním požadavkem bylo přesné pozicování snímače v terénu a současně přesné georeferencování dat měřených tímto snímačem. Pro experiment byla použita upravená verze mobilního robotu Orpheus-X3 bez hlavice s kamerami. Fotografie upraveného robotu pro účely tohoto experimentu je uvedena na obrázku 6.1. Pro navigaci mobilního robotu bylo použito řešení sebelokalizace založené pouze na RTK řešení pozice i azimutu získaných z GNSS přijímače Trimble BD982.

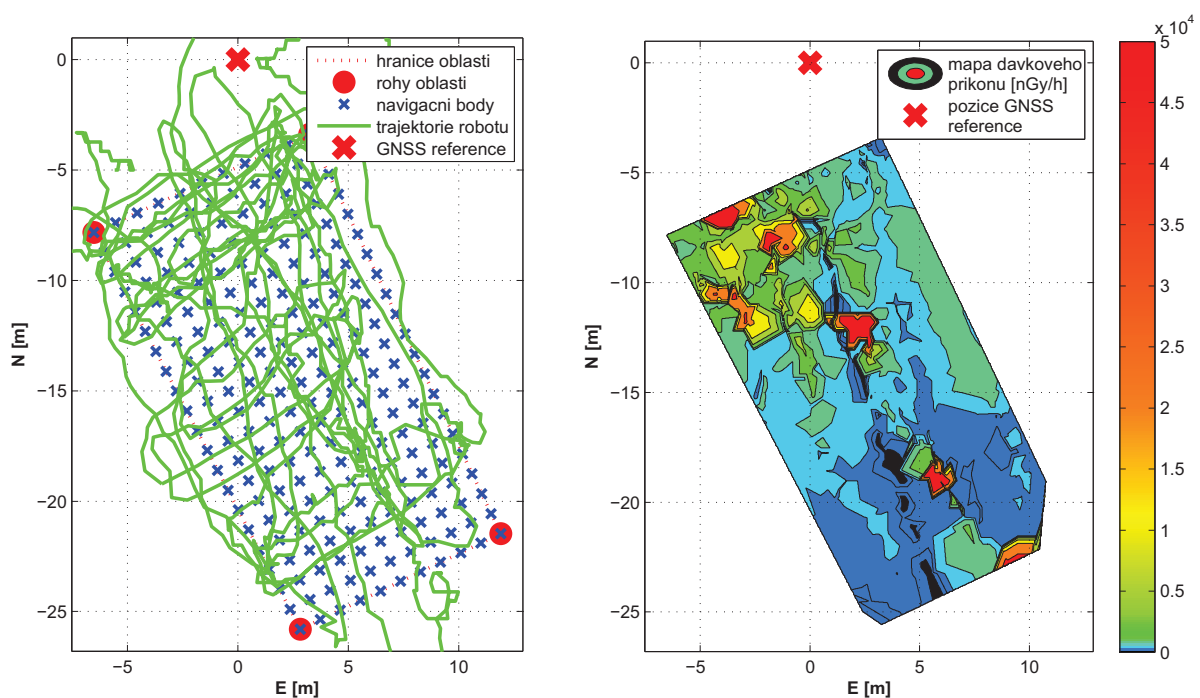


Obr. 6.1: Orpheus-X3 upravený pro měření gama záření – pohled zepředu

Definovaná oblast byla postupně projížděna v liniích, které byly od sebe vzdáleny přibližně 1 m. Po dokončení těchto linií byly provedeny příčné linie vzdálené přibližně 5 m od sebe. Rozměry oblasti byly přibližně 90 x 15 m. V druhé části experimentu bylo provedeno mapování dílčí části původně definované oblasti. Pro tuto dílčí oblast byla zvolena rozteč linií 1 m pro podélný i příčný směr mapování. Současně byly použity parametry navigace optimalizované pro dosažení vyšší přesnosti. Použitý senzor gama záření obsahoval i základní GPS přijímač pracující v autonomním režimu (bez korekčních dat) pouze se signálem L1 C/A a určujícím polohu na základě kódového měření vzdálenosti. Trajektorie pohybu mobilního robotu získaná z tohoto GNSS přijímače je uvedena na obrázku 6.3 vlevo. Intenzitní mapa gama záření sestavená na základě uvedených pozičních dat je na obrázku 6.3 vpravo. Při srovnání trajektorií pohybu na obrázcích 6.2 a 6.3 lze vidět významný přínos použití RTK řešení polohy, který se pochopitelně promítá i do přesnosti výsledné mapy intenzity gama záření. V případě, že jsou dostupné mapové podklady pro danou oblast, je možné výsledek měření automaticky integrovat do vybraného mapového podkladu pro jeho lepší interpretovatelnost. Detailnější popis principu metody je uveden v článku [12].



Obr. 6.2: Skutečná trajektorie detailního mapování (vlevo) a výsledná mapa intenzity gama záření (vpravo) získané na základě RTK řešení pozice z BD982



Obr. 6.3: Skutečná trajektorie detailního mapování (vlevo) a mapa intenzity gama záření (vpravo) získané z L1 GPS přijímače integrovaného ve snímači gama záření

## 6.2 Porovnání sebelokalizačních metod

První skupina experimentů byla provedena pro srovnání výsledků jednotlivých sebelokalizačních metod v situacích s omezeným příjmem GNSS signálů oproti stavu, kdy je příjem GNSS signálů ideální. Druhá skupina experimentů byla zaměřena na vyhodnocení přesnosti sledování žádané trajektorie pohybu mobilního robotu při použití jednotlivých sebelokalizačních metod. Třetí skupina experimentů ověřovala správnou funkčnost automatické volby nejvhodnější sebelokalizační metody pro dané pracovní podmínky. V této skupině experimentů byla vždy pro daný experiment vybrána určitá skupina sebelokalizačních metod, s nimiž byla navigační metoda testována. V průběhu každého z těchto experimentů došlo vždy ke zhoršení podmínek příjmu GNSS signálů u zvoleného sebelokalizačního systému a následně došlo k obnovení výchozího stavu.

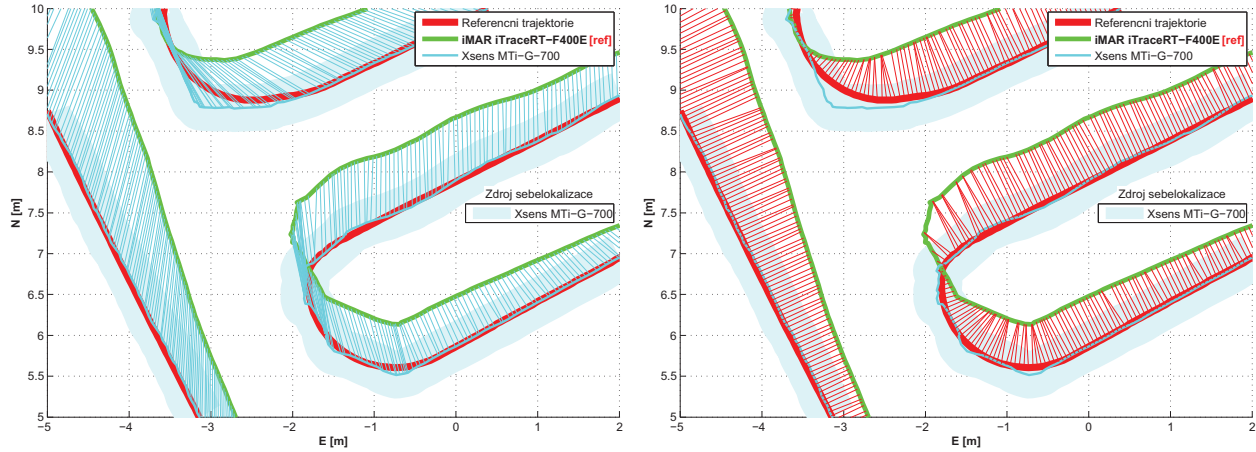
Pro popisovanou sérii experimentů byl použit upravený mobilní robot Orpheus-X3. Kamerová hlavička robotu nebyla v těchto experimentech použita. Fotografie mobilního robotu vybaveného všemi sebelokalizačními systémy je uvedena na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Mobilní robot Orpheus-X3 upravený pro experimenty

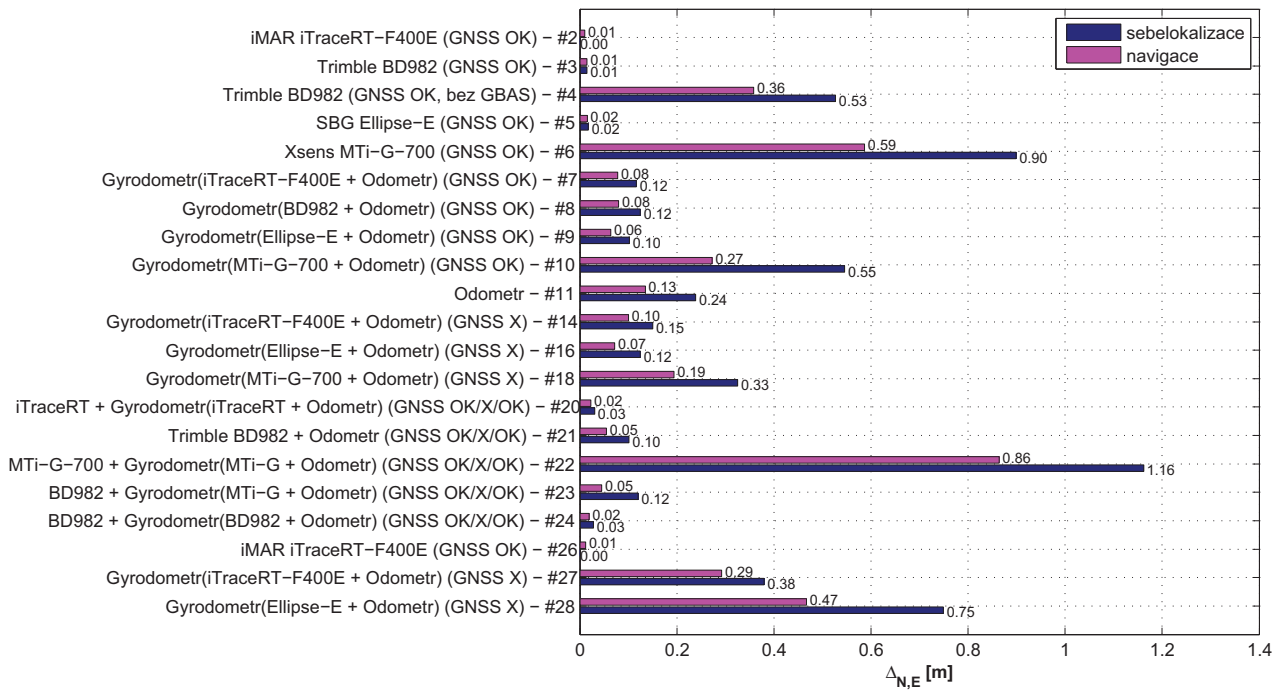
Z naměřených trajektorií pohybu mobilního robotu v horizontální rovině jednotlivými sebelokalizačními systémy byly vyhodnoceny odchylky pro každou sebelokalizační metodu. Jako referenční data pro vyhodnocení odchylek byla použita data ze systému iMAR iTraceRT-F400E. V případě, že tento systém nepracoval v optimálních pracovních podmínkách, byl použit GNSS přijímač BD982 jako zdroj referenčních dat. Pro vyhodnocení souboru odchylek sebelokalizačních metod byl proveden rozdíl dat pocházejících ze stejného časového okamžiku. Soubor odchylek pro vyjádření kvality navigace byl získán jako vzdálenost mezi body žádané trajektorie a pozicí mobilního robotu získanou z referenčního systému. Při porovnávání dvou sebelokalizačních metod je možné pro výběr korespondujících vektorů souřadnic ze srovnávaných metod zvolit jako kritérium korespondence čas. V úloze vyhodnocení výsledků navigace je žádaná trajektorie popsána pouze posloupností bodů bez časových značek, proto není možné

použít pro korespondenci časovou informaci. Zvolená metodika pro vyhodnocení kvality navigace hodnotí proto jen rozdílnost pozice korespondujících si bodů v obou trajektoriích podle použité metodiky. Průběh rychlostí v jednotlivých úsecích žádané trajektorie nevstupuje do hodnocení. Jako korespondující body žádané a skutečné trajektorie jsou vybrány body, které leží na normále k žádané trajektorii v daném navigačním bodě.



Obr. 6.5: Odchyly pozice při hodnocení výsledků sebelokalizace a navigace

Na obrázku 6.6 jsou v grafu uvedeny souhrnné výsledky hodnocení sebelokalizace a navigace v provedených experimentech při použití jednotlivých sebelokalizačních metod s ideální a omezenou dostupností GNSS signálů. V grafu jsou vyneseny střední hodnoty velikosti odchylek pozice při hodnocení kvality sebelokalizace a navigace podle uvedené metodiky pro použitou referenční trajektorii. Pro obecné závěry má tento způsob hodnocení význam jen pro soubor odchylek nevykazujících trend a pocházejících z experimentů, ve kterých nedocházelo k významným změnám pracovních podmínek. V opačném případě je možné učinit závěry jen pro konkrétní experiment. Výsledky uvedené v grafu na obrázku 6.6 potvrzují dosažitelnost vysoké přesnosti sebelokalizace i navigace při použití RTK řešení pozice (experimenty č. 2, 3, 5, 26). Střední hodnota velikosti odchylek podle zvolené metodiky je 1 až 2 cm. Naproti tomu metody založené na GNSS řešení pozice, které využívají pro měření vzdáleností kódové měření, vykazují očekávatelnou střední odchylku 0,5 až 1,2 m (experimenty č. 4, 6, 22). V ostatních experimentech byly použity dead-reckoning metody, takže dosažené výsledky nelze nijak zobecnit. Pouze lze zhodnotit, že na zvolené trajektorii o délce přibližně 75 m nebyla překročena střední hodnota odchylek 0,4 m v příznivém terénu, vyjma experimentu č. 10. Jízda v travnatém svahu při nevyhovujícím příjmu GNSS signálů (experimenty č. 27 a 28) způsobila významně vyšší odchylky, než jízda po pevném podkladu za jinak stejných podmínek (experimenty č. 14 a 16).



Obr. 6.6: Střední hodnota velikosti odchylek pozice mobilního robotu při hodnocení kvality sebelokalizace a navigace

### 6.3 Použití více navigačních metod pro režim konvoje

Tento experiment se konal ve vojenském újezdu Libavá, v rámci testování mobilního robotu Taros 6x6 V2. V tomto experimentu se ověřovala funkčnost datové fúze na úrovni žádaných parametrů ( $v_R^s$ ,  $\omega_R^s$ ) pohybu mobilního robotu při navigaci šestikolového mobilního robotu Taros 6x6 V2. Výběr nejlepšího řešení žádaného pohybu podle zvolených kritérií byl prováděn ze dvou použitých metod. První navigační metodou byla metoda popisovaná v této práci. Druhá z metod byla založena na strojovém zpracování obrazu z kamery a informaci o ujeté vzdálenosti z odometru. Tato metoda byla realizována skupinou inteligentní a mobilní robotiky ČVUT v Praze. Referenční trajektorie pro mobilní robot Taros 6x6 V2 byla v reálném čase definována jízdou mobilního robotu Orpheus-X3. Pro sebelokalizaci mobilního robotu Taros 6x6 V2 byl použit pouze GNSS přijímač BD982 se dvěma anténami AG25GNSS. Sebelokalizace mobilního robotu Orpheus-X3 zahrnovala pouze řešení souřadnic jeho pozice a byla realizována GNSS přijímačem BD982 s jednou anténou AG25GNSS. Oba použité GNSS přijímače BD982 poskytovaly RTK řešení pozice.

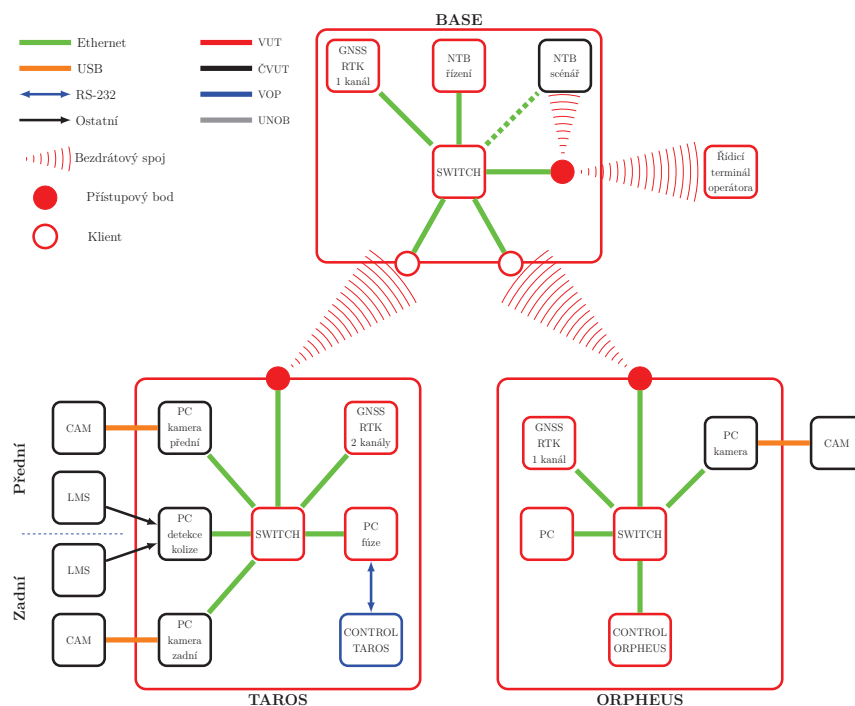
Funkčnost řešení byla ověřena v situaci, kdy první robot (Orpheus-X3) byl řízen manuálně operátorem a druhý robot (Taros 6x6 V2) byl v reálném čase navigován na základě trajektorie jízdy robotu vedoucího konvoj. Fotografie obou robotů v konvoji je na obrázku 6.7.

V první části experimentu byla pro navigaci robotu Taros 6x6 V2 použita pouze metoda uvedená v této práci. Ve druhé části experimentu byla do navigačního procesu zařazena i druhá

navігаční metoda vyvíjená kolegy z ČVUT. Výhodou této metody je její nezávislost na GNSS. Kritériem použitým pro přepínání mezi oběma metodami byla aktuální hodnota konfidence obou metod. U metody založené na GNSS byla konfidence odvozena od aktuální predikované směrodatné odchylky pozice v horizontální rovině. U metody založené na strojovém zpracování obrazu z kamery byla konfidence odvozena od aktuálního detekovaného počtu příznaků v obraze z kamery.



Obr. 6.7: Mobilní roboti Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2 v konvoji



Obr. 6.8: Blokové schéma realizace experimentu

## 7 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

V dizertační práci je uveden přehled současných sebelokalizačních metod vhodných pro realizaci velmi přesné navigace pozemních mobilních robotů ve vnějších prostředích. V práci je popsána nově vyvinutá navigační metoda, která s uvažovanými sebelokalizačními systémy založenými na RTK GNSS umožňuje dosáhnout centimetrové přesnosti sledování žádané trajektorie. Metoda byla navržena s ohledem na její jednoduchou parametrizovatelnost, takže je možné ji velmi snadno použít pro libovolné UGV. Tato vlastnost byla ověřena v reálných experimentech při navigaci mobilních robotů Orpheus-X3 a Taros 6x6 V2.

Pro zvýšení robustnosti celé navigační metody byly navrženy, implementovány a v reálných experimentech ověřeny metody datové fúze v různých úrovních navigačního procesu. První datová fúze je prováděna nad daty sebelokalizačních systémů, která poskytuje navigačnímu algoritmu nejlepší souřadnice pozice a vektor orientace podle nastavených kritérií. Druhá datová fúze je prováděna na úrovni jednotlivých řešení pohybu mobilního robotu, která jsou získána ze všech dostupných navigačních metod. Integrace obou datových fúzí značně zvyšuje celkovou robustnost navigace UGV při náročných misích v komplikovaném terénu, ve kterém není obvykle zajištěna plná dostupnost RTK řešení v celém průběhu mise. Datová fúze na úrovni řešení pohybu mobilního robotu přináší také snadnou realizovatelnost redundance, kdy je možné stejná navigační řešení počítat na různých výpočetních systémech a v reálném čase z nich vybírat jen validní řešení. Uvedené řešení koncepce navigace současně přináší i možnost dynamické distribuovatelnosti výpočtu navigačních řešení podle dostupných prostředků na použitých výpočetních systémech.

Provedené experimenty dokazují dosažitelnost centimetrové přesnosti sledování trajektorie v příznivém terénu. Z experimentů je také patrný vývoj chyb navigace pro jednotlivé použité sebelokalizační metody. Experimenty ukazují, že v případě špatného příjmu GNSS signálů, řešení pozice založené pouze na datové fúzi GNSS+INS a s cenou jednotek milionů nedosahuje přesnosti, která by byla dostatečná pro použití v uvažovaných aplikacích. Estimace pozice mobilního robotu založená na datech z jeho pohonů je stále pro reálné nasazení v obecném terénu, ve kterém je komplikovaný příjem GNSS signálů, klíčová. Metody kombinující informaci o ujeté vzdálenosti s orientací získanou z INS v experimentech dosahovaly střední hodnoty růstu chyby přibližně od 2 mm do 2 cm na 1 m ujeté vzdálenosti v závislosti na typu terénu. Nejperspektivnější se proto pro reálné použití jeví kombinace dvoufrekvenčního RTK GNSS přijímače se dvěma anténami, levnějšího INS s MEMS senzory a odometru instalovaných na každém kole. Použití cenově méně dostupných a energeticky náročnějších INS s optickými gyroskopy nepřináší adekvátní přínosy pro popisovanou aplikaci.

Vyvinutá metoda byla použita i ve dvou reálných aplikacích. První z nich bylo přesné autonomní mapování intenzity gama záření v zadané oblasti a tvorba intenzitní mapy s vysokým rozlišením a následné určení pozic center oblastí se zvýšenou intenzitou. Tento experiment byl proveden ve spolupráci se Státním ústavem pro radiační ochranu, v.v.i. Druhou z testovaných aplikací byla navigace většího UGV na základě dat z malého průzkumného robotu, kdy

větší UGV přijíždí po trajektorii malého průzkumného robotu do problematického místa, kde proběhne naložení/vyložení nákladu a velké UGV následně směřuje zpět na základnu v době, kdy malý průzkumný robot pokračuje v průzkumu prostředí. Tato aplikace byla otestována v rámci několikadenního pobytu ve vojenském újezdu Libavá při testování UGV Taros 6x6 V2 vyvíjeného podnikem VOP s.p.

Budoucí vývoj uvedené koncepce navigace bude směřovat zejména k vylepšení používaných dead-reckoning metod, které jsou využívány po výpadku RTK řešení pozice. To bude zahrnovat automatickou kalibraci konstant kinematického modelu pro aktuální terén a obecně změnu zpracování všech redundantních dat, které má ještě významný potenciál pro dosažení lepších výsledků. Dále lze zvážit přechod od současných kinematických modelů podvozku s vybranými dynamickými omezeními k jejich plným dynamickým modelům. Jedním z několika dalších aspektů reálného nasazení je řešení automatické volby parametrů navigační metody pro minimalizaci energetické spotřeby pohonů u smykem řízených mobilních robotů dle aktuálního terénu. V průběhu experimentů bylo zjištěno, že k minimalizaci této spotřeby vedou v travnatých terénech zcela jiné přístupy řešení než na pevných površích (beton, asphalt apod.). Další zajímavou realizací může být automatické přepínání režimů kinematiky u podvozků, které to umožňují (např. v experimentech použitý Taros 6x6 V2). Celkově je možné se tímto přístupem přiblížit manévrovatelnosti smykem řízeného podvozku. Realizace tohoto typu řízení vyžaduje již ale podporu na úrovni řešení navigační úlohy.

## Poděkování

Tato práce vznikla v rámci Středoevropského technologického institutu (CEITEC) s pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje, za podpory Technologické agentury České republiky projektem č. TE010-20197 „Centrum aplikované kybernetiky 3“ a grantu VG 2012 2015 096 „Kooperativní robotický průzkum nebezpečných oblastí“ Ministerstva vnitra České republiky, v rámci „Programu bezpečnostního výzkumu České republiky v letech 2010 až 2015“ (BV II/2-VS).

# LITERATURA

- [1] *JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology: Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. BIMP, třetí vydání, 2012.
- [2] Andersen, J.: *Mobile Robot Navigation*. Dizertační práce, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2006.
- [3] Borenstein, J.; Everett, H.; Feng, L.: *Where am I?: Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. University of Michigan, 1996.
- [4] Borenstein, J.; Feng, L.: Gyrodometry: a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots. In *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, ročník 1, 4 1996, ISSN 1050-4729, s. 423–428.
- [5] Boucher, C.; Altamimi, Z.: *Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. 2011.
- [6] Chong, K. S.; Kleeman, L.: Accurate odometry and error modelling for a mobile robot. In *1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*, ročník 4, 4 1997, s. 2783–2788, doi:10.1109/ROBOT.1997.606708.
- [7] Choset, H.; Lynch, K.; Hutchinson, S.; aj.: *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. MIT Press, 2005, ISBN 978-0-262-03327-5.
- [8] Grewal, M.; Weill, L.; Andrews, A.: *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley, druhé vydání, 2007, ISBN 978-0-470-04190-1.
- [9] Groves, P.: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House, druhé vydání, 2013, ISBN 978-1-60807-005-3.
- [10] Hofmann-Wellenhof, B.; Legat, K.; Wieser, M.: *Navigation: Principles of Positioning and Guidance*. Springer, 2003, ISBN 3-211-00828-4.
- [11] Hruška, K.; Bradík, J.: *Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti*. Vysoké učení technické v Brně, druhé vydání, 2001, ISBN 80-214-1656-4.
- [12] Jilek, T.: Radiation intensity mapping in outdoor environments using a mobile robot with RTK GNSS. In *2015 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, 5 2015, s. 695–701, doi:10.1109/MILTECHS.2015.7153755.
- [13] Kaplan, E.; Hegarty, C.: *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House, druhé vydání, 2006, ISBN 1-58053-894-0.
- [14] Penelope, S.: *Active Sensors for Local Planning in Mobile Robotics*. World Scientific Publishing, 2001, ISBN 981-02-4681-1.

## PUBLIKAČNÍ ČINNOST

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Evaluation of real accuracy of azimuth measurement in the external environment using GNSS compass. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*. 2011. Vienna, Austria: DAAAM International Vienna, 2011. p. 1493-1494. ISBN: 978-3-901509-83-4.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Security of remote management of embedded systems running MikroTik RouterOS operating system using proprietary protocols. In *Proceedings of 11th IFAC/IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*. 2012. 10344 Virginia Lee Dr. Centerville, OH 45458, USA: IFAC-PapersOnLine / Elsevier, 2012. p. 138-142. ISBN: 978-3-902823-21-2.

BURIAN, F.; ŽALUD, L.; FLORIÁN, T.; JÍLEK, T. Unified storage for laser scanner data. In *Proceedings of 11th IFAC/IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*. 10344 Virginia Lee Dr. Centerville, OH 45458, USA: IFAC-PapersOnLine / Elsevier, 2012. p. 56-59. ISBN: 978-3-902823-21-2.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L.; BURIAN, F. Mobilní robot pro přesnou sebelokalizaci. In *Workshop Perspektivní projekty vývoje řídicích a senzorických technologií 2012 – Sborník příspěvků*. 2012. Brno: FEKT VUT, 2012. s. 84-88. ISBN: 978-80-214-4527-7.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Vyhodnocení přesnosti určení polohy. In *Workshop Perspektivní projekty vývoje řídicích a senzorických technologií září 2012 - Sborník příspěvků*. 2012. Brno: FEKT VUT, 2012. s. 50-54. ISBN: 978-80-214-4547-5.

JÍLEK, T.; ŽALUD, L. Polygon pro testování sebelokalizace mobilních robotů. In *Sborník anotací konference Juniorstav 2013*. 2013. Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, 2013. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4669-4.

ŽALUD, L.; KOCMANOVÁ, P.; BURIAN, F.; JÍLEK, T. Color and Thermal Image Fusion for Augmented Color and Thermal Image Fusion for Augmented Reality in Rescue Robotics. In *The 8th International Conference on Robotic, Vision, Signal Processing & Power Applications: Innovation Excellence Towards Humanistic Technology (Lecture Notes in Electrical Engineering) [Hardcover]*. 2014. Springer, 2014. p. 47-56. ISBN: 978-981-4585-42-2.

ŽALUD, L.; BURIAN, F.; KOPEČNÝ, L.; KOCMANOVÁ, P.; JÍLEK, T. Remote Robotic Exploration of Contaminated and Dangerous Areas. In *Proceedings of INTERNATIONAL CONFERENCE ON MILITARY TECHNOLOGIES 2013*. Brno: Military Academy, Czech Republic, 2013. p. 1309-1316. ISBN: 978-80-7231-918-3.

BURIAN, F.; ŽALUD, L.; KOCMANOVÁ, P.; JÍLEK, T.; KOPEČNÝ, L. Multi-Robot System for Disaster Area Exploration. In *Flood Recovery, Innovation and Response IV*. Great Britain: WIT Press, 2014. p. 263-274. ISBN: 978-1-84564-785-8.

KOCMANOVÁ, P.; ŽALUD, L.; BURIAN, F.; JÍLEK, T. Multispectral Data Fusion for Robotic Reconnaissance and Mapping. In *ICINCO 2014 Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics Volume 2*. Portugal: 2014. p. 459-466. ISBN: 978-989-758-040-6.

ŽALUD, L.; KOCMANOVÁ, P.; BURIAN, F.; JÍLEK, T.; KALVODA, P.; KOPEČNÝ, L. Calibration and evaluation of parameters in a 3D proximity rotating scanner. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 2015, vol. 21, no. 1, p. 3-12. ISSN: 1392-1215.

JÍLEK, T. Autonomous field measurement in outdoor areas using a mobile robot with RTK GNSS. In *IFAC Conference on Programmable Devices and Embedded Systems*. Krakow, Polsko: 2015. p. 491-496. ISSN: 1474-6670.

JÍLEK, T. Radiation intensity mapping in outdoor environments using a mobile robot with RTK GNSS. In *International Conference on Military Technologies Proceeding, ICMT'15*. Brno: IEEE, 2015. p. 695-701. ISBN: 978-80-7231-976-3.

## ABSTRAKT

Dizertační práce pojednává o současných možnostech navigace pozemních mobilních robotů se zaměřením na dosažení vysoké absolutní shody žádané a skutečné trajektorie jejich pohybu. V práci jsou rozebrány současné možnosti klíčových sebelokalizačních metod – globálních družicových navigačních systémů, inerciálních navigačních systémů a odometrie. V jádru práce je popsána navigační metoda umožňující dosáhnout s uvedenými sebelokalizačními metodami centimetrové přesnosti sledování žádané trajektorie jízdy mobilního robotu. Nová navigační metoda je navržena s ohledem na její velmi snadnou parametrizovatelnost, respektující omezení použitého podvozku. Po vhodné parametrizaci navigační metody tak může být tato metoda nasazena na jakýkoliv typ podvozku. Koncepce navigační metody umožňuje integrovat a využívat současně více sebelokalizačních systémů a externích navigačních metod, což přispívá ke zvýšení celkové robustnosti procesu navigace mobilního robotu. Práce se dále zabývá řešením kooperované jízdy skupiny heterogenních mobilních robotů v konvoji. Navržené algoritmy byly ověřeny v reálných podmínkách provozu ve třech odlišných experimentech.

## KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní robot, sebelokalizace, navigace, RTK GNSS, INS, kinematika robotu, odometrie, datová fúze, konvoj

## ABSTRACT

The doctoral thesis discusses current options for the navigation of unmanned ground vehicles with a focus on achieving high absolute compliance of the required motion trajectory and the obtained one. The current possibilities of key self-localization methods, such as global satellite navigation systems, inertial navigation systems, and odometry, are analyzed. The description of the navigation method, which allows achieving a centimeter-level accuracy of the required trajectory tracking with the above mentioned self-localization methods, forms the core of the thesis. The new navigation method was designed with regard to its very simple parameterization, respecting the limitations of the used robot drive configuration. Thus, after an appropriate parametrization of the navigation method, it can be applied to any drive configuration. The concept of the navigation method allows integrating and using more self-localization systems and external navigation methods simultaneously. This increases the overall robustness of the whole process of the mobile robot navigation. The thesis also deals with the solution of cooperative convoying heterogeneous mobile robots. The proposed algorithms were validated under real outdoor conditions in three different experiments.

## KEYWORDS

mobile robot, self-localization, navigation, RTK GNSS, INS, robot kinematics, odometry, data fusion, convoy